

# PVA에 고정화된 질화세균군에 의한 암모니아성 질소 제거 I. 충진율 및 공기 유입률이 암모니아성 질소제거에 미치는 영향

†서근학·김병진·<sup>1</sup>오창섭  
부경대학교 화학공학과, <sup>1</sup>호서대학 화학공학과  
(접수 : 2001. 4. 26., 게재승인 : 2001. 6. 25.)

## Removal of NH<sub>3</sub>-N by Using Immobilized Nitrifier Consortium in PVA(Polyvinyl Alcohol)-I. Effect of Packing Fraction and Aeration Rate on Ammonia Nitrogen Removal

Kuen-Hack Suht†, Byong-Jin Kim, and Chang-Sup Oh<sup>1</sup>  
Dept. of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea  
<sup>1</sup>Dept. of Chemical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea  
(Received : 2001. 4. 26., Accepted : 2001. 6. 25.)

A nitrifier consortium immobilized in polyvinyl alcohol was used to remove ammonia nitrogen from synthetic wastewater in an airlift bioreactor. The minimum aeration rates were 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 vvm for 5, 10, 15 and 20% immobilized bead packing volume fraction, respectively. The efficient packing fraction and the aeration rate for ammonia nitrogen removal were 15% and 2.4 vvm, respectively. With a hydraulic retention time of 0.5 hr, the removal rate and the efficiency of ammonia nitrogen removal were 1685 g/m<sup>3</sup>·day and 48% at an influent ammonia nitrogen concentration of 75 g/m<sup>3</sup>.

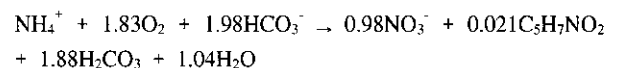
**Key Words** : polyvinyl alcohol, ammonia removal, aeration rate

### 서론

수중의 총암모니아(total ammonia, TA)는 비이온성 암모니아(NH<sub>3</sub>)와 이온성 암모니아(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 두 가지 형태로 존재한다. 중성의 pH에서 암모니아의 99%는 이온성 암모니아로 존재하며 pH가 높아질수록 비이온성 암모니아의 농도가 증가한다. 비이온성 암모니아는 동물의 세포벽을 통과하여 저농도에서도 어류에게 치명적인 피해를 주고(1), 또한 암모니아는 질산성 질소나 아질산성 질소로 산화되면서 수중의 용존산소를 고갈시키므로 암모니아성 질소를 신속히 제거하는 수처리 공정이 필요하다.

폐수 속의 암모니아를 제거하는 방법에는 파괴점 염소 주입법 (breakpoint chlorination), 선택성 이온 교환법 (selective ion exchange), 탈기법 (air stripping) 등의 물리화학적 방법과 질산화에 관여하는 미생물을 이용하는 생물학적 처리법이 있다(2).

생물학적 암모니아 제거공정은 자연적인 미생물에 의한 정화기능을 증가시킨 방법으로 *Nitrosomonas* 속의 미생물에 의해 암모니아를 아질산성 질소로 산화시킨 후 *Nitrobacter* 속의 미생물에 의해 아질산성 질소를 질산성 질소로 산화시킨다. 이 생물학적 총괄 반응식은 다음과 같다(3).



생물학적 처리법 중 포괄 고정화법은 처리수와 미생물의 분리가 용이하고, 반응기 내부의 미생물 농도를 고농도로 유지할 수 있기 때문에 유입되는 폐수를 짧은 시간 안에 처리할 수 있다. 또한 온도나 pH 같은 환경조건이 급격히 변화하거나 독성물질이 유입되어도 고정화 미생물 자체의 완충작용에 의해 활성이 크게 변하지 않는 장점을 가진다(4). 포괄 고정화법에 많이 사용되는 담체로는 천연고분자인 *k*-carrageenan, alginate 등과 합성고분자인 PEG(polyethylene glycol), PVA (polyvinyl alcohol) 등이 있으며, 이 중 PVA는 가격이 저렴하고 장기간의 사용에 대한 내구성이 크며 고정화 시 미생물에 독성이 없는 장점을 가지고 있다(5,6).

†Corresponding Author : Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea  
Tel : +82-51-620-1467, Fax : +82-51-625-4055  
E-mail : khsuh@mail.pknu.ac.kr

Table 1. Synthetic feedstock solution

Component	Concentration (g/m <sup>3</sup> )	Function
NH <sub>4</sub> Cl	95.48	N source
NaHCO <sub>3</sub>	681.73	Alkalinity control
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	30.55	P source

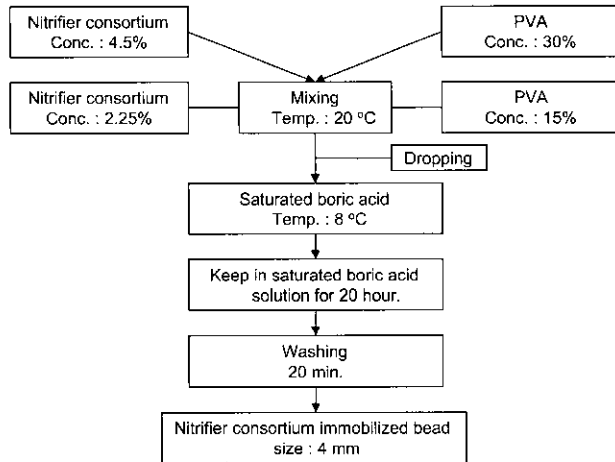


Figure 1. Preparation of nitrifier consortium immobilized bead by PVA-boric acid method.

본 연구는 폐수 중의 암모니아성 질소의 효율적인 제거를 위하여 질화세균이 포괄고정화된 PVA bead를 공기부상식 생물반응기에 충전하여 폐수내 암모니아성 질소 제거 실험을 행하며 고정화 bead 충전율, 공기유입속도의 영향 및 공급되는 암모니아 농도의 영향에 대하여 연구하였다.

### 재료 및 방법

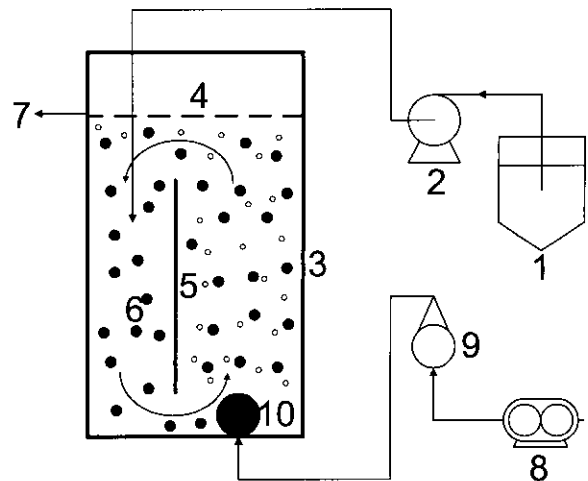
#### 질화세균이 고정화된 bead

본 연구에 사용한 질화세균균은 부산 수영 하수처리장의 활성 슬러지조의 활성 슬러지를 수거하여 Table 1에 나타낸 암모니아 배지를 공급해 질화세균균으로 1개월 동안 순양시켜 질화세균 활성을 확인 후 고정화에 사용하였다.

PVA-boric acid법(6)은 PVA 농도에 따라 고정화된 bead의 형태가 달라진다. 실험에 사용한 PVA는 Kurare사 (Osaka, Japan)의 PVA-HC (100% saponification; degree of polymerization, 2000)이다. PVA-boric acid법에 의한 질화세균 고정화 방법은 Figure 1에 나타내었다. 순양시킨 질화세균균은 3000 rpm에서 10분 원심분리시켜 농축 질화세균균을 얻은 후 질화세균균을 건조중량기준 4.5%(W/V)로 희석하고, 30%(W/V) PVA 용액과 동량의 부피로 혼합하였다. 그리고 기포가 생기지 않도록 천천히 혼합하여 PVA 15%-질화세균균 2.25%인 혼합용액을 만들었다. 이 혼합용액을 peristaltic pump를 이용하여 일정한 속도로 8°C로 냉각한 포화 boric acid 용액에 떨어뜨려 20시간 동안 보관하여 구형의 질화세균 고정화된 구형의 bead를 제조하였다. 상기 방법으로 제조된 질화세균이 고정화된 bead의 평균직경은 4 mm였다.

#### 공기부상식 생물반응기

실험에 사용한 공기부상식 생물반응기는 질화세균 고정화



- 1. Feed tank
- 2. Peristaltic pump
- 3. Airlift bioreactor
- 4. Screen
- 5. Baffle
- 6. Immobilized bead
- 7. Outlet port
- 8. Air pump
- 9. Rotameter
- 10. Air stone

Figure 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

된 bead의 유동성을 높이기 위하여 반응기 내부에 baffle을 설치한 split-cylinder airlift bioreactor 형태로 제작하였다(7). 공기부상식 생물반응기 및 실험장치의 모식도는 Figure 2과 같다. 공기부상식 생물반응기는 내경 8 cm, 높이 24 cm의 아크릴 관을 이용하여 제작하였으며 이때 반응기 체적은 500 mL이었다.

Bead 상승부의 하부에 산기석을 이용한 공기 분산기를 설치하여 질화세균 고정화된 bead를 유동시키고, 질산화에 필요한 산소를 공급하기 위해 일정양의 공기를 공급하였다. 공기의 공급은 공기펌프를 이용하여 반응기의 하부로 공급되게 하였으며 공급되는 공기의 유량확인과 조절은 rotameter를 이용하였다. 합성 폐수 유입구는 bead가 침강하는 부분인 하강부의 액면 아래에 설치하여 유입된 합성 폐수가 질화세균 고정화된 bead와 충분히 접촉 후 반응기 밖으로 배출되도록 하였다. 유출구는 하강부 상부에 설치하였으며, 반응기 상부에는 bead의 유출을 막기 위하여 유출구 아래에 미세망을 설치하였다.

#### 암모니아성 질소 제거 실험

합성 폐수는 Table 1의 암모니아 배지를 사용하였으며, 이때 암모니아성 질소(total ammonia nitrogen, TAN)의 농도가 25.0 g/m<sup>3</sup>이었는데, 이 농도는 도시하수의 암모니아성 질소 평균농도(8-9)를 기준으로 제조하였다. 합성 폐수의 성분은 암모니아성 질소원으로 NH<sub>4</sub>Cl, 질산화에 소모되는 알칼리도를 보충하기 위해 NaHCO<sub>3</sub>, 그리고 인성분으로 Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>이었으며, 이 기질들을 수돗물에 용해 후 정량펌프를 이용해 수력학적 체류시간을 0.5시간으로 고정시켜 공급하였다. 암모니아성 질소의 농도를 변화시 동일비율로 혼합하여 제조하였다. 공기부상식 생물반응기의 상승부로 공급되는 공기는 반응기 내부의 질화세균 고정화된 bead를 유동시키기 위하여 공기펌프를 이용하여 공급하였다. 질화세균 고정화된 bead는 공기

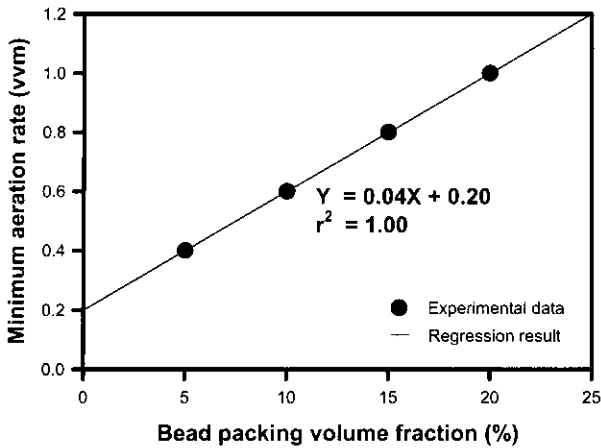


Figure 3. Minimum aeration rate for flotation of nitrifier consortium immobilized bead.

부상식 생물반응기 체적에 대하여 5, 10, 15 및 20%로 충전하여 실험을 수행하였고, 공기부상식 생물반응기 내부로 유입되는 공기는 각 충전율의 최소공기 유입속도에 대하여 최대 4배까지 공기유입속도를 변화시키면서 공기부상식 생물반응기에서 충전율과 공기유입속도에 따른 암모니아 제거의 관계를 고찰하였다.

**분석방법**

유출수 및 유입수의 암모니아성 질소는 암모니아 선택 전극(Orion Research Inc.-9512BN)이 부착된 Ion meter (Orion Research Inc.-720A)를 이용하여 선택성 전극법(10)에 의해 분석하였다. 반응기 내의 용존산소 및 pH는 반응기 상단에 용존산소측정기(YSI 55)와 pH meter(Orion Research Inc.-290A)를 부착하여 측정하였다.

**결과 및 고찰**

**최소공기 유입속도에 의한 암모니아 제거 특성**

Figure 3은 공기부상식 생물반응기에 질화세균 고정화된 bead를 반응기 부피에 대하여 5, 10, 15 및 20%(V/V)로 충전하였을 때 bead를 유동시키기 위한 최소공기 유입속도를 나타낸 그림이다. 반응기에 대해 질화세균이 고정화된 bead의 충전율이 높아짐에 따라 bead를 유동시키기 위한 최소공기 유입속도는 각각 충전율 5, 10, 15 및 20%에 대하여 공기유입속도가 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0 vvm이었으며 충전율이 4.0배 증가하였을 때 최소공기 유입속도는 2.5배 증가하였다. 질화세균이 고정화된 bead의 충전율과 bead 유동을 위한 최소공기 유입속도의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$MIAR = 0.04 \times BPVF + 0.20$$

MIAR : Minimum aeration rate (volume volume minute, vvm)

BPVF : Bead packing volume fraction (%)

Figure 4은 합성폐수의 암모니아성 질소 농도를 25 g/m<sup>3</sup>으로 공급하고 수력학적 체류시간이 0.5시간일 때 bead를 유동시키기 위해 공기를 최소공기 유입속도로 반응기 내부에

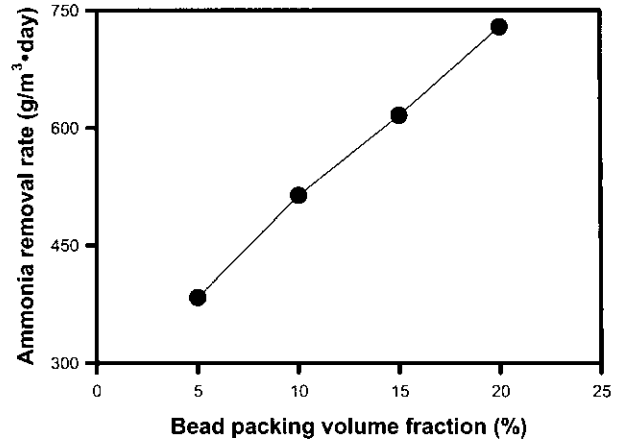


Figure 4. Effect of bead packing volume fraction on ammonia removal rate at the minimum aeration rate.

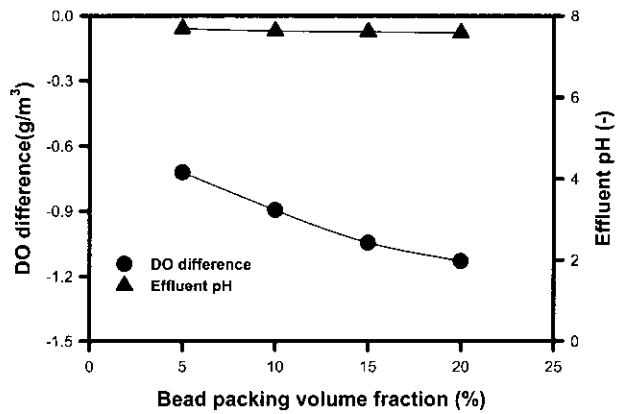


Figure 5. Change of DO concentration difference and effluent pH on bead packing volume fraction at the minimum aeration rate.

흘려보내는 조건에서, 공기부상식 생물반응기에 질화세균이 고정화된 bead를 충전율 5, 10, 15 및 20%로 변화시키에 따른 암모니아 제거속도를 나타낸 그림이다. 최소공기 유입속도일 때 충전율이 높아짐에 따라 암모니아 제거속도는 점점 증가하나, 5%의 충전율일 때 암모니아 제거속도에 비하여 충전율이 4.0배 많아진 20%의 충전율일 때 암모니아 제거 속도는 2.0배 정도 증가하였다.

이는 Figure 3의 충전율이 4.0배 증가하였을 때 최소공기 유입속도가 2.5배 증가하는 결과와 유사한 경향을 보이며, bead의 충전율이 높아짐에 따라 반응기내에 질화세균이 고정화된 bead의 중량이 증가하여 액체순환속도가 감소하고 이로 인하여 암모니아와 bead의 접촉기회가 줄었기 때문으로 판단된다.

Figure 5는 공기를 최소공기 유입속도로 반응기 내부에 흘려보내는 조건에서, 공기부상식 생물반응기에 질화세균이 고정화된 bead를 충전율 5, 10, 15 및 20%로 변화시키에 따른 유출수에 대한 유입수의 용존산소 차와 유출수의 pH변화를 나타낸 그림이다. 충전율이 높아짐에 따라 유출수에 대한 유입수의 용존산소 차는 점점 증가하였다. 이는 Figure 4에서 충전율이 높아짐에 따라 질화세균이 고정화된 bead의 암모니아 제거속도는 점점 증가하였기 때문에 충전율이 높아짐에 따라 암모니아 산화에 필요한 용존산소의 소비가 증가하여

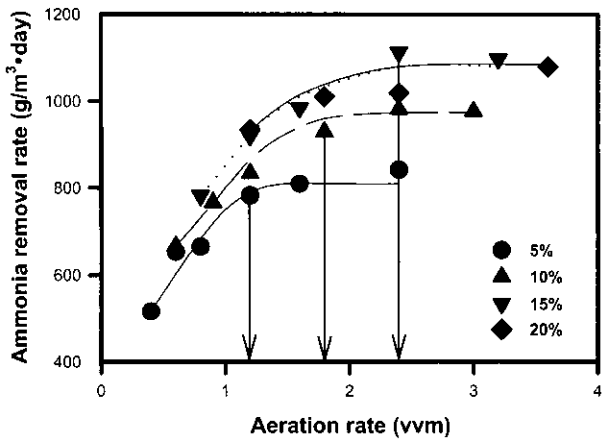


Figure 6. Effect of aeration rate on ammonia removal rate.

유출수에 대한 유입수의 용존산소 차는 증가하는 것으로 판단된다.

1 g의 암모니아성 질소를 질산성 질소로 산화하기 위하여 알칼리도로 6.0~7.4 g 정도의 CaCO<sub>3</sub>가 소모되는데, 이것이 수중 pH 저하의 원인으로 알려져 있다(3). 본 실험에서 충전율이 높아짐에 따라 암모니아 제거속도가 점점 증가하므로 반응기내 pH는 점점 감소하리라고 예상되었다. 그러나 본 실험에서 충전율이 높아짐에 따라 암모니아 제거속도가 증가하여도 pH의 변화는 일어나지 않았으며 약 pH 7.6을 유지하였다. 이는 Table 1에 나타난 것과 같이 합성폐수 조성 시 암모니아성 질소의 양에 대한 충분한 양의 알칼리도가 보충되었기 때문에 판단된다.

**공기유입속도 변화에 의한 따른 암모니아 제거 특성**

Figure 6은 암모니아성 질소 농도를 25 g/m<sup>3</sup>으로 공급하고 체류시간이 0.5시간 일 때 공기부상식 생물반응기에 질화세균이 고정화된 bead를 5, 10, 15 및 20%로 충전하고 공기유입속도를 0.2 vvm에서 3.6 vvm까지 변화시켰을 때 각 충전율에 대한 암모니아 제거속도를 나타낸 그림이다.

이론적으로 1 g의 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되기 위해서는 4.18 g의 산소가 필요하다(11). 25 g/m<sup>3</sup>의 암모니아를 제거하기 위해서는 104.5 g/m<sup>3</sup>의 산소가 필요하며, 수중의 용존산소를 이용하여 25 g/m<sup>3</sup>의 암모니아성 질소를 제거하기 위한 충분한 양의 산소를 공급할 수 없다. 그러므로 외부로부터 공기유입에 의한 충분한 산소공급이 필요하다.

Figure 6에서 공기유입속도가 증가함에 따라 암모니아성 질소 제거속도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 공기유입속도가 증가함에 따라 암모니아성 질소 제거를 위한 산소 전달이 원활히 이루어졌기 때문이다. 그러나 각 충전율에 대하여 공기유입속도를 계속 증가하는 경우, 일정속도 이상의 공기유입속도에서 암모니아성 질소 제거속도는 일정하게 유지되었다. 이는 공기유입속도가 증가하면 공기부상식 생물반응기 내부의 액체 순환속도가 상승하여 암모니아 산화가 증가하지만 일정속도 이상의 공기유입속도에서는 암모니아성 질소를 제거하기 위한 충분한 양의 산소가 전달되었으므로 더 이상 산소 전달이 암모니아성 질소 제거에 관여하지 않았기 때문에 판단된다(12).

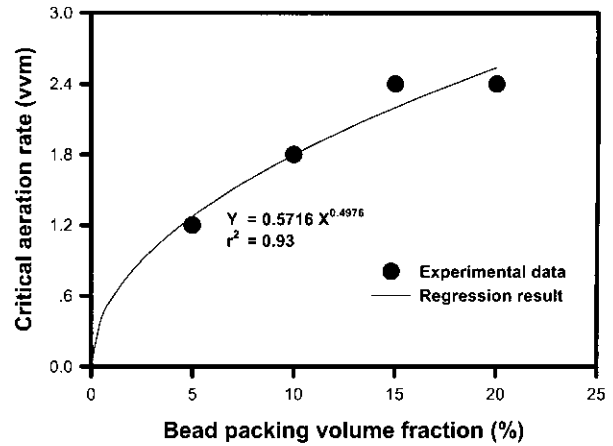


Figure 7. Change of critical aeration rate on bead packing volume fraction.

공기유입속도를 최대 3.6 vvm까지 공급 시 각 충전율에 대한 암모니아 제거속도는 충전율이 높아짐에 따라 제거속도가 증가하나 충전율 15%와 20%일 경우 거의 동일하게 나타났다. 따라서 공기부상식 생물반응기를 이용한 질화세균이 고정화된 bead의 충전율은 15%가 가장 효과적이며, 반응기내에 충전율 15% 이상 질화세균이 고정화된 bead를 충전하는 것은 비효율적일 것으로 예상된다.

Figure 6에서 충전율 5, 10, 15 및 20%에서 공기유입속도가 증가함에 따라 암모니아 성 질소의 제거속도는 증가하고, 일정속도 이상의 공기유입속도에서 암모니아성 질소 제거속도는 거의 일정하게 나타났다. 여기에서 각 충전율에 대하여 공기유입속도가 변화하여도 암모니아 제거속도가 변화하지 않는 최소공기 유입속도가 암모니아 제거속도에 아무런 영향을 미치지 않는 임계공기 유입속도(critical aeration rate)가 된다. 각 충전율 5, 10, 15 및 20%에 대하여 각각 1.2, 1.8, 2.4 및 2.4 vvm의 공기유입속도가 각 충전율에 대한 임계공기유입속도로 나타났다.

Figure 7는 각 충전율 5, 10, 15 및 20%에 대한 임계공기유입속도의 관계를 나타낸 그림이다. 본 실험에 사용한 질화세균이 고정화된 bead가 충전되어 있는 생물반응기의 최대 암모니아 제거속도를 얻기 위한 각 충전율에 대한 공기유입속도의 관계는 충전율 20% 이하의 조건에서 아래의 식으로 나타났으며, 충전율 15%에서 최대 암모니아 제거속도를 얻기 위한 임계공기유입속도는 2.4 vvm이었다.

$$CAR = 0.5716 \times BPVF^{0.4976}$$

CAR : Critical aeration rate (vvm)

BPVF : Bead packing volume fraction (%)

**공급액의 암모니아성 질소농도의 영향**

Figure 8은 수력학적 체류시간이 0.5시간 일 때 공기부상식 생물반응기에 질화세균 고정화된 bead를 10, 15%로 충전시키고 공기유입속도를 2.4 vvm으로 일정하게 유지한 조건에서, 공급되는 합성폐수의 암모니아성 질소 농도를 15, 25, 50 및 75 g/m<sup>3</sup>으로 변화시키기에 따른 암모니아 제거속도 및 제거율을 나타낸 그림이다.

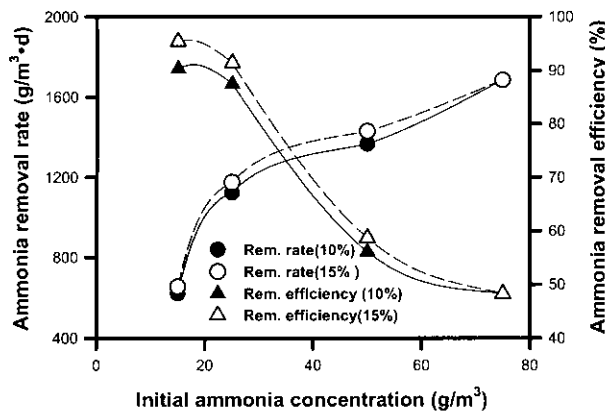


Figure 8. Effect of initial ammonia concentration on removal rate and removal efficiency.

충진율 10%와 15%는  $50 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 암모니아 제거속도를 나타내었고, 유입수의 암모니아성 질소 농도가  $75 \text{ g/m}^3$  일 때 암모니아 제거속도와 암모니아 제거율은 각각  $1685 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ , 48%로 나타났다. 공급액의 암모니아 농도가 15,  $25 \text{ g/m}^3$  일 때 암모니아 제거율은 87.5% 이상을 나타내었고, 특히 충진율 15%에서는 HRT 0.5시간에서  $15 \text{ g/m}^3$ 의 암모니아를 95% 이상 제거하였다. 본 실험에 의한 암모니아성 질소 제거속도는 Matsumura(13) 등에 의한 유입수의 암모니아성 질소 농도가  $60 \text{ g/m}^3$  시 3 mm 및 5 mm 질화세균 고정화된 bead를 이용하여  $840$  및  $490 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$ 에 비하여 매우 높은 제거속도를 나타내어 본 실험에 의한 암모니아 제거는 매우 효과적임을 알 수 있었다.

본 실험에서 유입수의 암모니아 농도가 높아짐에 따라 암모니아 제거속도가 점점 증가하였다. 이는 질화세균이 고정화된 bead 외부와 내부의 암모니아 농도차가 커져 질화세균이 고정화된 bead 경막에서 물질전달속도의 증가하였기 때문으로 생각된다.

유입수의 암모니아 농도가 높아짐에 따라 암모니아 제거율은 점점 감소하였다. 이는 유입수의 암모니아 농도가 높아져 물질전달속도가 높아졌지만 질화세균이 고정화된 bead 내의 질화세균의 농도는 일정하기 때문에 처리 가능한 암모니아만 처리하고 남은 잔류 암모니아 농도가 높아지므로 암모니아 제거율은 감소하는 것으로 판단된다.

### 요 약

질화세균이 고정화된 PVA bead를 이용한 공기부상식 생물 반응기의 운전에서 각 충진율과 최소유입공기량의 관계는 다음과 같이 나타났으며 충진율 증가비에 따른 최소유입공기량 증가비는 충진율 증가비에 따른 암모니아 제거속도 증가비와 유사한 경향을 나타내었다.

$$MIAR = 0.04 \times BPVF + 0.2$$

각 충진율에 대하여 공기유입속도가 증가함에 따라 암모니아 제거속도가 증가하였으며, 일정량 이상의 공기유입속도는

암모니아의 산화에 영향을 미치지 않았다. 공기부상식 생물 반응기에서 고정화된 질화세균에 의한 암모니아 제거 시 가장 효과적인 bead의 충진율은 15%, 공기유입속도는 2.4 vvm 이었다. 질화세균이 고정화된 bead가 충진되어 있는 공기부상식 생물반응기의 충진율 20% 이하의 조건에서 최대 암모니아 제거속도를 얻기 위한 각 충진율에 대한 임계공기 유입속도의 관계는 다음과 같이 나타났다.

$$CAR = 0.5716 \times BPVF^{0.4976}$$

충진율 10 및 15%에서 공급액의 암모니아성 질소농도가  $75 \text{ g/m}^3$  일 때 암모니아성 질소의 제거속도 및 제거율은 각각  $1685 \text{ g/m}^3 \cdot \text{day}$  와 48%로 나타나 매우 높은 제거속도를 나타내었다.

### 감 사

이 논문은 2000학년도 부경대학교 기성회 학술연구조성비에 의하여 지원되었으며 이에 감사를 포함한다.

### REFERENCES

- Liao, P. B. and R. D. Mayo (1974), Intensified Fish Culture Combine Water Reconditioning with Pollution Abatement. *Aquaculture*, **3**, 61-85.
- Bitton, G. (1994), *Wastewater Microbiology*, p102, John Wiley and Sons.
- Sharma, B and R. C. Ahlert (1977), Nitrification and Nitrogen Removal, *Water Res.*, **11**, 897-925.
- Emily, J. T. M., Vitor, A. P., Kataja, C. F., Johannes, T., and H. Rene' (1999), Characteristics and Selection Criteria for Support Material for Cell Immobilization in Wastewater Treatment, *Water Res.*, **31**, 2985-2996.
- Ariga, O., T. Yamakawa, H. Fujimatsu, and Y. Sano (1989), Immobilization of  $\beta$ -Galactosidase with Polyvinyl Alcohol, *J. of Ferm. and Bioeng.*, **68**, 293-295.
- Hashimoto, S. and K. Furukawa (1987), Immobilization of Activated Sludge by PVA-Boric Acid Method, *Biotech. and Bioeng.*, **30**, 52-59.
- Chisti, M. Y. (1989), *Airlift Bioreactors*, p345, Elsevier Applied Science, London and New York.
- Randall, C. W., V. M. Pattarkine, and S. A. McClintock (1992), Nitrification Kinetics in Single Sludge Biological Nutrient Removal Activated Sludge Systems, *Water Sci. Tech.*, **25**, 195-214.
- Kim, M. H., J. H. Cho, Y. H. Kim, Y. W. Lee, and W. K. Lee, (1998), The Difference of the Microbial Phase in Biofilms, *J. KSWQ*, **14**, 339-345.
- APHA, AWWA WEF (1998), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., p4-108, EPS Group.
- Timmons, M. B. and T. M. Losordo (1994), *Aquaculture Water Reuse System*, p.327, Elsevier Science B. V., New York and Tokyo.
- Garrido, J. M., W. A. J. van Benthum, M. C. M. van Loosdrecht, and J. J. Heijnen (1997), Influence of Dissolved Oxygen Concentration on Nitrite Accumulation in a Biofilm Airlift Suspension Reactor, *Biotech. and*

- Bioeng.*, **53**, 168-178.
13. Matsumura, M., T. Yamamoto, P. Wang, K. Shinabe, and K. Yasuda (1997), Rapid Nitrification with Immobilized

Cell using Macro-Porous Cellulose Carrier, *Wat. Res.*, **31**, 1027-1034.